



Tribologie du laminage à froid de tôles = Tribology in metal forming

Pierre Montmitonnet

► To cite this version:

Pierre Montmitonnet. Tribologie du laminage à froid de tôles = Tribology in metal forming. Revue de Métallurgie, 2001, 2, pp.Pages 125-130. 10.1051/metal:2001165 . hal-00574244

HAL Id: hal-00574244

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00574244>

Submitted on 7 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Tribologie du laminage à froid de tôles

P. Montmitonnet

Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF),
École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis

Le laminage dépend de manière critique du frottement et de la lubrification, tant pour le contrôle du procédé que pour la qualité du produit fini. Pechiney et Usinor ont donc entrepris en 1995, en partenariat avec le CNRS, un ambitieux projet regroupant sept laboratoires publics autour de l'Irsid et du Centre de Recherches de Voreppe, sur les deux grands domaines de la lubrification : mécanique de la formation du film lubrifiant entre surfaces rugueuses déformables, et formation des films limites (tribochimie), en vue de construire un modèle de laminage incluant un modèle de frottement prédictif et local. Ce sont les efforts et les résultats de ce CPR (Contrat de Programme de Recherches) « Mise en Forme des Matériaux : contact métal - outil - lubrifiant » qui sont décrits dans ce numéro et un numéro ultérieur de Science et Génie des Matériaux.

■ INTRODUCTION

Examinons les micrographies de la *figure 1*, surfaces d'acier inoxydable ferritique laminé à froid dans des conditions diverses. Celle de la *figure 1a* est un état normal après un recuit brillant : ensemble de fines rayures parallèles à la direction de laminage. *Figure 1c*, la même tôle a été laminée en une passe de forte réduction : la surface se couvre d'« écailles », dont la « tête » pointe vers l'entrée de l'emprise. *Figure 1b*, la même tôle a été laminée plus vite, avec une faible réduction : la structure granulaire apparaît à la surface, agrémentée de lignes transversales ! Comment expliquer ces différences ? Par le régime de lubrification (1).

La tôle de la *figure 1b* a été laminée dans des conditions telles qu'un régime de lubrification hydrodynamique (HD, ou « film épais ») a été atteint : un film de lubrifiant fluide continu sépare complètement les deux surfaces solides. Il s'ensuit un phénomène classique de réarrangement de grains lors de la déformation plastique d'une surface libre (2), complétée par des émergences de micro-bandes de cisaillement. *Figure 1c*, le film fluide a quasiment disparu, c'est la lubrification limite : de nombreux contacts tôle - cylindres conduisent à la formation, sur ces derniers, de couches de transfert épaisses et rugueuses, formées de particules d'acier inoxydable ; ces particules rayent alors la surface de la tôle.

La formation d'une surface correcte (*fig. 1a*) apparaît comme la marque d'un régime mixte bien tempéré, intermédiaire entre les deux précédents : des contacts fréquents permettent de mater la rugosité pré-existante, sans que le transfert – phénomène d'usure inévitable dans un contact – ne dégénère, ce grâce à l'interposition de la juste quantité d'un lubrifiant bien composé (3). Si on sait maîtriser le régime de lubrification, on peut se livrer par laminage à une véritable ingénierie des surfaces, fabriquant à volonté une rugosité de morphologie et d'amplitude prédéterminées (4).

Un autre exemple est le laminage de feuille mince, dite « papier aluminium ». Du fait du « Roll Kiss » (ou « laminage à roule », c'est-à-dire de la mise en contact des cylindres de travail de part et d'autre de la feuille (5) par suite de leur déformation élastique), augmenter la force ne suffit plus à augmenter la réduction : le serrage passe en force de contact cylindre - cylindre. On régle alors l'épaisseur en jouant sur les tensions de bande amont et surtout aval, et sur le frottement via la vitesse (par effet HD) : c'est la sensibilité des contraintes normales à ces deux paramètres qui permet ce mode de fonctionnement. Notons-le bien : *le frottement devient ici un actionneur du procédé*.

Beaucoup de choses, en laminage, se ramènent donc au régime de lubrification et au frottement qui lui correspond. Le frottement doit être maintenu *bas*, sans quoi la force et le couple augmentent ; mais pas trop bas si l'on veut éviter le patinage (insuffisance d'entraînement de la tôle par les cylindres) : souvenons-nous que le frottement, qui est le moteur de cette opération, est indispensable pour laminier. Le frottement doit d'autre part être aussi *constant* que possible. Or il dépend de la vitesse (effets HD) ; les phases transitoires sont donc délicates. Ainsi, on sait qu'au moins en monopasse, la force diminue lorsque la vitesse augmente si l'on utilise une huile entière ; elle augmente si on utilise une émulsion. Le préréglage de l'entrefer doit en tenir compte. Enfin, dans une industrie moderne, tout doit être planifié,

Manuscrit reçu le 20 juin 2000, bon à publier le 21 décembre 2000.

© La Revue de Métallurgie 2001.

Tribology of strip cold rolling

P. Montmitonnet

Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF),
École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis

Friction is a critical parameter in strip cold rolling :

- for the final strip surface quality : depending on the lubrication regime, quite different roughness patterns can be obtained (fig.1) ;
- for the process control : e.g. in thin foil rolling where roll kiss occurs, the reduction is no more controlled by the roll force, but by strip tensions and friction, both determining the contact stresses ; friction is in turn controlled by speed via hydrodynamic (HD) effects.

Therefore, friction is requested to be moderate to keep reasonable force and torque, but not so low as to promote skidding ; as constant as possible, even during transients (remember a neat oil will give decreasing friction during acceleration, an emulsion generally an increase of friction and force) ; and if possible predictable, so as to pre-set correctly the equipment.

Rolling is generally performed under the mixed lubrication regime, whereby decisive roles are played both by the chemistry of the lubricant (formation of tribofilms by adsorption and chemical reactions) and by hydrodynamic entrainment, connected with viscosity, roll velocity, pass geometry and strip roughness through Reynolds' equation. There is a coupling between the fluid film formation and the roughness : the film defines the interaction of roughness peaks ; roughness takes part in the film formation. It controls the real area of contact (« plateaux » area), their shape and orientation, all those parameters conditioning in turn friction and the partition of the load (roll pressure) between the « plateaux » and the « valleys ». In this regime, three protective « shields » separate the strip metal from the tool surface to avoid seizure (fig. 2) :

- the fluid film, which disappears in very high pressure areas ;
- the boundary films formed from additives (polar or extreme-pressure EP or anti-wear AW) ;
- the oxide film, which will break due to its brittleness when the surface area increases in metal forming processes.

A group of seven French public laboratories associated with CNRS has been formed in connection with Usinor Company's research centre (Irsid) and Pechiney Company's Centre de Recherches de Voreppe. They have worked on :

- the structural transformations of the oxide layer and the metal sub-layers, as observed by electronic microscopies and surface analytical techniques ;

- the tribochemical reactions, analysed by AES, XPS and ToF-SIMS, between the lubricant (including its additives) and the surfaces, depending on whether oxide is present or naked metal is exposed, in situ in a UHV tribometer or ex situ on scratched, compressed or rolled strip surfaces ;
- the mechanisms of formation of the boundary layers by demixion from the base oil and adsorption prior to chemical reaction, seen in an EHD ball-on-disk machine with interferometric film thickness measurement ;
- measurement of lubricant viscosity under high pressure and shear rates, i.e. under conditions relevant for a high pressure lubricated contact ;
- the occurrence of sliding at the wall, between an hexadecane film and a sapphire surface, depending on the presence and morphology of a polar, boundary film (SAM or grafted) ;
- the influence of roughness on the fluid film formation, including cavitation effects in diverging areas, and computation of flow factors to be included in Reynolds' equation ;
- a mixed regime tribological model with local average film thickness and real area of contact as internal variables, coupled with a 2D slab method model of rolling.

The results of these studies are detailed, together with the methods, models and techniques used or developed in the following papers of this issue and a future issue.

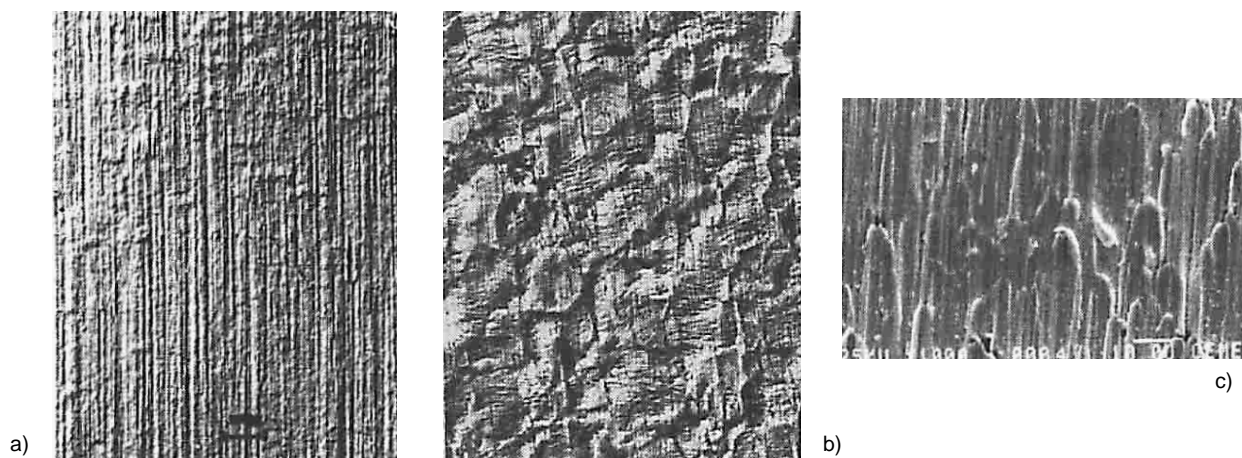


Figure 1. – États de surfaces et régimes de lubrification en laminage à froid de tôles d'acier inoxydable. a) État de surface « normal », recuit brillant après laminage à froid sur laminoir Sendzimir, régime mixte ; b) tôle laminée à froid à grande vitesse sur laminoir duo, régime HD ; c) tôle laminée à froid à forte réduction sur laminoir duo, régime quasi-limite avec couche de transfert épaisse.

Figure 1. – Surface states and lubrication regimes in stainless steel strip cold rolling. a) « normal » surface state, bright anneal after cold rolling on a Sendzimir mill, in the mixed regime ; b) cold rolled strip from a 2-high mill, high speed (hydrodynamic regime) ; c) cold rolled strip, 2-high mill, high reduction, quasi-boundary lubrication with formation of a thick roll coating.

contrôlé, automatisé et modélisé ; la simulation numérique est omniprésente dans l'industrie du laminage, et il est reconnu que l'ignorance du coefficient de frottement à utiliser en est la principale pierre d'achoppement. C'est pourquoi le frottement devrait, idéalement, être *prédictible* en fonction des conditions de laminage et des conditions de lubrification.

Un modèle tribologique doit donc fournir une approche *prédictive et locale* du coefficient de frottement et de ses effets, ce qui passe obligatoirement par une prise en compte de la physique des interactions microscopiques.

■ LE RÉGIME DE LUBRIFICATION MIXTE : MÉCANIQUE DES FLUIDES ET TRIBOCHIMIE

En laminage, l'emprise travaille le plus souvent en régime de lubrification mixte, encore appelé « plateaux - vallées » ou « poches - plateaux », selon que ce sont les vallées qui sont interconnectées et laissent circuler le lubrifiant (phénomènes hydrodynamiques) ou au contraire les plateaux qui sont reliés et isolent le lubrifiant dans des poches (phénomènes hydrostatiques) ; entre les deux, on définirait un « seuil de percolation ». Par « plateaux » on entend les zones en contact intime (disons que l'épaisseur des films interposés, solides ou fluides, est inférieure à quelques dizaines de nm) ; par opposition, les vallées ou les poches contiennent des films fluides d'épaisseur supérieure à 100 nm. La fonction de répartition de taille des « plateaux », leur facteur de forme et leur orientation, la longueur des plateaux dans la direction de glissement sont des paramètres clés du régime mixte (6).

Le rapprochement entre ces surfaces rugueuses, donc l'aire et la forme des plateaux, dépendent fondamentalement de l'épaisseur du film lubrifiant entraîné (fonction de sa viscosité,

de la vitesse, des caractéristiques géométriques de la passe, de la rugosité des antagonistes). Celle-ci est calculable par l'équation de Reynolds (7), à condition d'y inclure deux effets opposés de la rugosité : résistance hydraulique d'une part, entraînement d'autre part (8). Il y a donc couplage entre la présence de la rugosité et la formation du film lubrifiant, qui gère l'aire réelle de contact et par elle la répartition de la charge (force ou pression de laminage) entre les plateaux et les vallées, ainsi que la proportion de la contrainte de frottement qui provient de chacune de ces entités.

L'autre composante est de nature chimique, et se relie à la lubrification limite : les divers ingrédients du lubrifiant (huile de base minérale, additifs polaires ou extrême - pression, eau s'il s'agit d'une émulsion) interagissent chimiquement avec la surface – oxyde ou métal dénudé par le contact –, soit faiblement (physisorption), soit fortement avec formation de liaisons chimiques et de produits de réaction (chimisorption). C'est plus particulièrement le frottement sur les plateaux, de par l'absence ou la quasi-absence de film fluide, qui est géré par cette tribochimie (chimie du frottement).

■ ANALYSE TRIBOLOGIQUE DU LAMINAGE

La rugosité des surfaces est donc, à l'évidence, une caractéristique fondamentale du régime mixte ; mais en laminage, elle évolue le long de l'emprise par conformation plastique des aspérités de la tôle sur la surface rigide du cylindre. Notons à ce propos que par « plateaux » on entend simplement les zones où les surfaces solides se rapprochent le plus : ils ne sont pas forcément plats.

Chaque fois qu'un morceau de surface métallique de la tôle (dénudée de son oxyde) viendra en contact avec le cylindre, une particule de taille micronique sera arrachée (usure adhésive) et formera, sur le cylindre, un élément de la

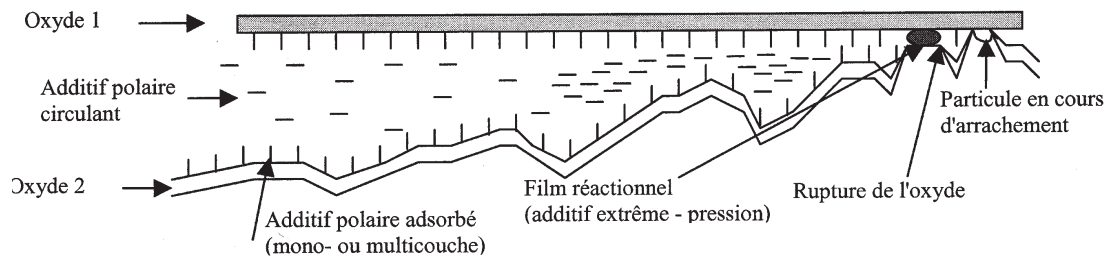


Figure 2. – Vue schématique (en coupe) du régime mixte, montrant : la formation des films limites par démixtion progressive entre additifs et base dans les entrefers fins, adsorption puis réaction chimique ; la déformation plastique des aspérités créant des « plateaux » et y détruisant la couche d'oxyde ; la formation éventuelle de particules de transfert.

Figure 2. – Schematic section of a mixed regime contact, showing: formation of boundary films by progressive demixtion of additives from the base oil in thin gaps, adsorption then chemical reaction ; plastic deformation of asperities, creating « plateaux » and destroying the oxyde layer ; possible formation of transfer film particles.

couche de transfert dont la croissance conduira à la formation d'écailles (ou « griffes de chaleur » pour les sidérurgistes) comme figure 1c, et à une forte augmentation du frottement (donc de la force et du couple de laminage). Pour éviter cette dégradation, on compte sur trois écrans successifs (fig. 2) :

- le film fluide constitue le premier rempart. Il cède lorsque la pression augmente (l'équation de Reynolds montre que haute pression = faible épaisseur) ;
- la lubrification limite va y suppléer : les additifs, molécules polaires attirées par les surfaces solides, s'y concentrent puis s'y adsorbent avant, éventuellement, d'y réagir chimiquement pour former des films protecteurs ;
- enfin, si les films limites sont déchirés, il reste l'oxyde, céramique moins adhérente aux cylindres que ne l'est le métal. Mais l'aire de la surface de la tôle augmentant nécessairement, cette couche fragile ne peut que se rompre lors d'une grande déformation plastique.

■ LES CONNAISSANCES DE DÉPART

Le domaine de la lubrification mixte du laminage n'est pas vierge. On connaît depuis longtemps l'adsorption des additifs polaires, leur efficacité fonction de la polarité (acides > alcools > amines grasses), la diminution du frottement lorsque la longueur de chaîne augmente, lorsque le taux de recouvrement augmente (notion d'isotherme d'adsorption (9)), l'effet match - mismatch (longueur de chaîne relative de l'additif et de la base), la perte d'efficacité par désorption lorsque la température monte au-delà de 100°C. Quant aux additifs extrême - pression (EP) / anti-usure (AW) (la distinction est floue), ils sont utilisés essentiellement sur les aciers : les EP chlorés donnent du chlorure de fer, les soufrés du sulfure, les phosphorés des phosphates organométalliques sous forme vitreuse (10). Tous ces produits ont été largement étudiés dans les huiles pour moteurs, mais les conditions de contact en laminage sont différentes, et les pratiques y sont spécifiques : on n'utilise que des additifs polaires, acides et alcools, sur l'aluminium ; l'acier fait usage des EP. Il faut dire que bien d'autres contraintes que le seul coefficient de frottement sont imposées au lubrifiant de laminage (absence de corrosion, de dépôts tachants, ...).

Quant à la partie « mécanique des fluides », rappelons-nous que l'équation de Reynolds a 115 ans (7). D'abord appliquée aux problèmes hydrodynamiques « basse pression » (on peut négliger la déformation des parois solides), elle l'a ensuite été aux contacts lubrifiés « haute pression », dits EHD (élasto-hydrodynamiques) parce que les solides s'y déforment élastiquement, ou PHD (plasto-hydrodynamiques) parce que l'un des antagonistes est en déformation plastique. En mise en forme des métaux, le laminage a été le champ privilégié d'application de ces théories (11). Puis on a introduit le fait que les surfaces sont en fait rugueuses (7, 8, 12), avant de commencer à traiter vraiment le régime mixte, avec des zones en contact (13-15). Au départ du CPR, nous étions confrontés à des modèles de laminage en régime mixte dits « basse vitesse », i.e. très faibles épaisseurs moyennes de lubrifiant (14), et d'autres dits « haute vitesse », proches du régime HD (13). Malheureusement, chaque type avait, en fonction de la vitesse, son domaine de convergence, et les deux domaines ne se recouvraient pas ...

■ LES TRAVAUX DU CPR « CONTACT MÉTAL - OUTIL - LUBRIFIANT »

Un groupement de sept laboratoires du CNRS a été constitué autour des laboratoires industriels de Pechiney (le Centre de Recherches de Voreppe) et d'Usinor (l'Irsid) pour combler les lacunes dans nos connaissances de la tribologie du laminage, et construire des outils de connaissance (appareillages ou modèles) afin de faire progresser la lubrification (= composition du lubrifiant + systèmes de maintenance du lubrifiant et d'arrosage). Nous avons volontairement restreint le champ de la recherche à deux tôles et un acier à cylindres :

- un alliage léger, 5182 (Al-Mg), fourni à l'état écroui, en sortie de train tandem à froid industriel, ainsi que relaminé à froid dans des conditions différentes (basse vitesse) ;
- un acier ultra-bas carbone, « interstitial Free » au titane, dit IF-Ti, à l'état recuit et à l'état écroui par relaminage à froid en laboratoire ;
- le 100C6 trempé revenu pour les cylindres.

Ils ont été caractérisés par le Laboratoire de Métallurgie Structurale de l'Université de Paris XI - Orsay (LMS) sur le plan métallurgique ; leur composition de surface a été analysée par le LMS, le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes de l'École Centrale de Lyon (LTDS) et le CEMEF, École des Mines de Paris.

Nous n'avons utilisé comme lubrifiants que des huiles entières (pour des raisons de simplicité), formulées pour l'occasion, mais proches de la pratique industrielle :

- pour l'alliage léger, un « kérosène », huile très peu visqueuse additionnée d'alcool laurique (AL) et d'acide iso-stéarique (AIS) ;
- pour l'acier, une huile paraffinique plus visqueuse, additionnée d'un ester, le tri-oléate de glycérol (TOG), d'acide stéarique (AS), d'un composé soufré pour extrême - pression, EP-S, et d'un composé EP phosphoré, EP-P.

Ces lubrifiants, fabriqués par mélange de produits du commerce, de faible pureté, ont été analysés par le Service Central d'Analyse du CNRS (SCA), partie prenante du Programme. Leur rhéologie sous haute pression et sous haute vitesse de cisaillement a été mesurée au Laboratoire de Mécanique des Contacts de l'INSA de Lyon (LMC).

Les travaux plus spécifiquement tribologiques s'analysent en ayant recours à la vision des trois écrans superposés (présentant, bien sûr, de fortes interactions entre eux) :

1) *Sur quoi vont d'adsorber les additifs ?* Le LMS a étudié la composition et la structure de la couche d'oxyde, celle du métal sous-jacent, ainsi que l'interface entre les deux, par microscopies électroniques (MEB, MET) et techniques d'analyse chimique de surface (AR-XPS, SIMS). La résistance mécanique de l'oxyde a été analysée en petites déformations de flexion et de traction.

2) *La tribochimie a été confiée à deux laboratoires :* Le LTDS a utilisé son tribomètre analytique sous ultravide, en le développant pour nos besoins. Les produits de réaction sont analysés après contact bille-plan linéaire alternatif (avec mesure du coefficient de frottement), l'atmosphère (UHV) comportant une pression partielle contrôlée d'une molécule portant les mêmes fonctions chimiques qu'un additif. Parallèlement, le CEMEF a appliqué son ToF-SIMS (time of flight - secondary ion mass spectroscopy) pour détecter les produits de réaction formés dans des conditions diverses : trempé dans un bain d'huile additivée, trempé + rayure, tôles issues de laminaires industriels, laminage en laboratoire (avec mesure du frottement), bipoinçonnement. Dans les deux derniers cas, une mesure de frottement a pu être corrélée aux analyses tribochimiques, de même qu'au LTDS bien sûr.

3) *Quelle est l'interaction entre un film limite adsorbé et le film fluide ?* Le Laboratoire de Physique de la Matière Condensée du Collège de France (PMC) s'est attaché à la condition cinématique à la paroi (glissement ou continuité de la vitesse ?), à l'aide d'une technique dérivée de celle qu'il avait précédemment utilisée pour les écoulements de poly-

mères (recouvrance de fluorescence après photo-blanchiment, dans une cellule de cisaillement rotatif). Le point clé : l'influence des films adsorbés sur cette condition.

4) *Par quelles étapes passe la formation des films limites ?* Le LMC a affiné la technique interférométrique de mesure d'épaisseur de films minces de lubrifiant sur une machine EHD bille-plan améliorée, qu'il a utilisée pour étudier la transition entre régime EHD et régime limite et qu'il a appelée domaine LFM (lubrification en film mince).

5) *Comment la rugosité interfère-t-elle avec l'écoulement du lubrifiant ?* Cette question a fait l'objet du développement par le LMC d'un simulateur de laminage, avec un cylindre transparent, dit « laminoir optique », destiné à laminier des bandes porteuses de rugosités modèles pour visualiser l'écoulement du lubrifiant à l'échelle de la rugosité. D'autre part, une étude théorique et numérique a été menée conjointement par le LMC et l'Institut de Mécanique des Fluides de l'INP de Toulouse (IMFT). Le LMC s'est intéressé à l'écoulement entre surfaces rugueuses, déterministes et périodiques, à l'aide des méthodes des éléments finis et des différences finies, appliquées à l'équation de Reynolds pour déterminer les conditions nécessaires à la création d'une portance hydrodynamique locale – donc d'un film lubrifiant « sur les plateaux ». Quant à l'IMFT, il a d'abord mis en évidence le caractère fractal (plus précisément auto-affine) de la rugosité des surfaces de tôles et de cylindres, et ses conséquences sur le transfert de rugosité ; puis il a spécifiquement étudié les conséquences de ce caractère fractal sur l'écoulement du film mince.

6) Enfin, le CEMEF a modifié un modèle mécanique de laminage pour lui coupler un modèle d'interface en régime mixte, tenant compte de la circulation du lubrifiant entre surfaces rugueuses (équation de Reynolds), mais à rugosité évolutive dont les transformations sont analysées par des modèles d'écrasement micro-plastique.

Remerciements

L'auteur tient à remercier pour son soutien scientifique autant que financier le CPR « Mise en Forme des Matériaux - Contact outil - métal - lubrifiant », Contrat de Programme de Recherche entre le CNRS (SCA), l'Irsid, Pechiney Recherche, l'Université de Paris-Sud Orsay (LMS), le Collège de France (PMC), l'ECL (LTDS), l'INPT (IMF), l'INSA de Lyon (LMC), l'ENSMC (CEMEF).

bibliographie

- (1) SCHEY (J.A.) – Metal deformation processes : friction and lubrication. Marcel Dekker Inc., New York (1970).
- (2) KASUGA (Y.), YAMAGUCHI (K.), KATO (K.). – Friction and lubrication in the deformation processing of metals. **Bull. JSME**, 11, 44 (1968), p. 344-365.
- (3) RIZOULIERES (B.), MONTMITONNET (P.). – Couche de transfert et frottement en laminage à froid des aciers inoxydables (résumé). **Rev. Mét.-CIT**, n° H.S. Journées d'Automne 1999, p. 174.

- (4) COLIN (J.-P.), COCCOZ (G.), PIERRE (G.), GRESSIER (R.), CHATELIN (A.), DA CRUZ (J.), MONTMITONNET (P.). – Transfert de rugosité sur bande mince d'Invar® pour application « shadow mask » (résumé). **Rev. Mét.-CIT**, n° H.S. Journées d'Automne 1999, p. 176.
- (5) HACQUIN (A.). – Modélisation thermomécanique 3D du laminage : couplage bande - cylindres. Thèse de Doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, École des Mines de Paris (1996).
- (6) TIAN (H.), SAKA (N.), SUH (N.P.). – Boundary lubrication studies on undulated titanium surfaces. **STLE Trib. Trans.**, 32 (1989), p. 289-296.
- (7) SZERI (A.Z.). – Some extensions of the lubrication theory of Osborne Reynolds. **ASME J. Tribology**, 109 (1987), p. 21-36.
- (8) PATIR (N.), CHENG (H.S.). – Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces. **J. Lub. Technol. (Trans. ASME)**, 101 (1979), p. 220-229.
- (9) JAHANMIR (S.), BELTZER (M.). – An adsorption model for friction in boundary lubrication. **ASLE Trans.**, 29, 3 (1986), p. 423-443.
- (10) Mc FADDEN (C.), SOTO (C.), SPENCER (N.D.). – Adsorption and surface chemistry in tribology. **Tribology Int.**, 30, 12 (1997), p. 881-888.
- (11) WILSON (W.R.D.), WALOWIT (J.A.). – An isothermal hydrodynamic lubrication theory for strip rolling with front and back tension. In Proc. Tribology Convention, Douglas, Isle of Man, UK (12-15 May 1971). The Instn. Mech. Engrs., Londres (1972).
- (12) EVANS (H.P.), SNIDLE (R.). – Analysis of micro-elastohydrodynamic lubrication for engineering contacts. **Tribology Int.**, 29, 8 (1996), p. 659-667.
- (13) SHEU (S.), WILSON (W.R.D.). – Mixed lubrication of strip rolling. **STLE Tribology Trans.**, 37 (1994), p. 483-493.
- (14) WILSON (W.R.D.), CHANG (D.F.). – Low speed mixed lubrication of bulk forming processes. **ASME J. Tribology**, 118 (1996), p. 83-89.
- (15) HU (Y.Z.), ZHU (D.). – A full numerical solution to the mixed lubrication in point contacts. **ASME J. Tribology**, 122 (2000), p. 1-9.